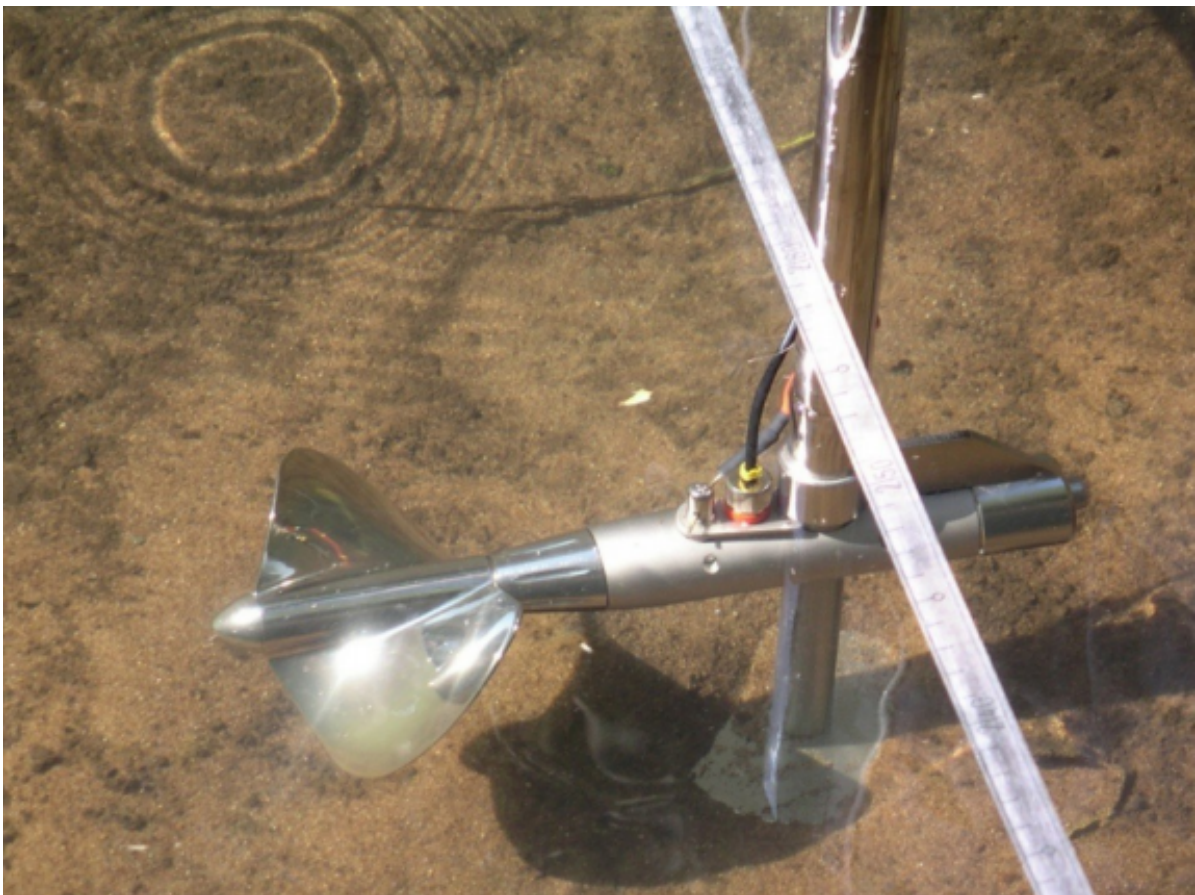


IP UMWELTBEOBACHTUNGEN
VERSUCH E

Hydrologie



März 2018

Inhaltsverzeichnis

1	Ziele	1
2	Fragen zur Vorbereitung aufs Kolloquium	1
3	Theorie	1
3.1	Einführung	1
3.1.1	Hydrologisches Einzugsgebiet	2
3.1.2	Hydrologisches Jahr	2
3.2	Niederschlag (P, „Precipitation“)	3
3.2.1	Messung des Niederschlags	3
3.2.2	Ermittlung des Gebietsniederschlags	4
3.3	Abfluss (R, „Runoff“)	4
3.3.1	Messung des Abflusses	4
3.4	Evapotranspiration (ET, „Evapotranspiration“)	5
3.4.1	Ermittlung der Evapotranspiration	5
3.4.2	Hydrologische Methode zur Bestimmung der Evapotranspiration	5
3.4.3	Klimatologische Methode zur Bestimmung der Evapotranspiration	6
3.5	Tipps zu den Aufgaben	6
3.5.1	Aufgabe 1	6
3.5.2	Aufgabe 2	7
3.5.3	Aufgabe 3	7
4	Aufgaben	8
4.1	Aufgabe 1: Klimatologische vs. hydrologische Methode zur Bestimmung der Evapotranspiration	8
4.2	Aufgabe 2: Höhenabhängigkeit der Evapotranspiration	9
4.3	Aufgabe 3: Beziehung zwischen Evapotranspiration und Gebietsniederschlag	10
5	Anhang	12
5.1	Informationen zu den Einzugsgebieten und deren Stationen	12
5.2	Formelsammlung	13

1 Ziele

- Komponenten der Wasserhaushaltsgleichung und deren Messungen kennen
- Grafiken aus hydrologischen Messdaten mithilfe von Matlab erstellen und analysieren
- Selber einfache Abschätzungen und Messungen des Abflusses durchführen

2 Fragen zur Vorbereitung aufs Kolloquium

1. Wie wird das hydrologische Einzugsgebiet/der Abfluss definiert?
2. Wieso wird in der Hydrologie das hydrologische Jahr statt dem gewöhnlichen Kalenderjahr verwendet?
3. Warum spielt die Evapotranspiration eine so wichtige Rolle im globalen Wasserhaushalt?

3 Theorie

3.1 Einführung

Die Hydrologie ist die Wissenschaft der Bewegung und Verteilung des Wassers auf der Erde, so wie auch auf anderen Planeten. Die zentrale Thematik der Hydrologie ist dabei die Wasserzirkulation um den ganzen Planeten, welche auf verschiedensten Pfaden und mit verschiedensten Raten geschieht.

Dazu einen kurzen Einblick in den Wasserkreislauf: Die Sonne ist der Antrieb des Wasserkreislaufs. Indem die Sonnenenergie die Wasseroberflächen und die Vegetation erwärmt, kommt es zur Verdunstung. Dabei entsteht Wasserdampf (90% von Wasseroberflächen und 10% von der Vegetation) in der Luft, der nach oben in die Atmosphäre steigt, abkühlt und kondensiert. Es entstehen Wolken, die durch den Wind zum Festland transportiert werden und dort ausregnen. Der Niederschlag fällt in Form von Regen, Schnee oder Hagel entweder direkt in Oberflächengewässer oder auf den Boden, wo das Wasser versickert und über den Grundwasserfluss zurück in Bäche und Flüsse und schlussendlich wieder in die Ozeane fließt.

Die Formel zur Beschreibung des Wasserkreislaufs lautet: P (Niederschlag) = ET (Evapotranspiration) + Q (Abfluss) + dS (Änderung der Speicherung). Die einzelnen Parameter werden in den nachfolgenden Kapiteln beschrieben.

In einer Grafik veranschaulicht findet ihr dies in Abbildung 1.

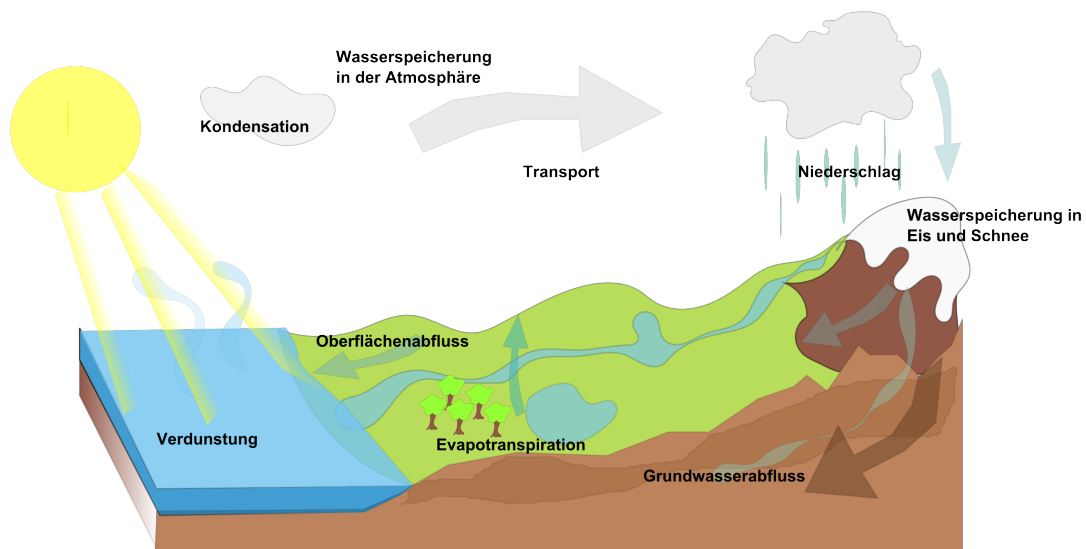


Abbildung 1: Schema des Wasserkreislaufes

Das gesamte Wasservolumen (1.4 Mrd. km³) der Erde zirkuliert im Wasserkreislauf. In den Ozeanen und Seen befinden sich 96.5% des gesamten Wassers. Schnee und Gletscher machen 1.7% aus, das Grundwasser macht ebenfalls 1.7% aus. Die Atmosphäre enthält 0.001%.

3.1.1 Hydrologisches Einzugsgebiet

Das hydrologische Einzugsgebiet ist eine Grösse, die für hydrologische Messungen entwickelt wurde. Es bezieht sich immer auf einen bestimmten Punkt eines Fließgewässers. Das hydrologische Einzugsgebiet dieses Punktes umfasst dann das gesamte Gebiet um den Punkt herum, welches abfließendes Wasser in das Fließgewässer liefert. Kurz: Es ist das Gebiet bzw. die Fläche, aus der ein Gewässersystem seinen Abfluss bezieht. (Siehe Abbildung 2). Dabei wird oft zwischen ober- und unterirdischem Einzugsgebiet unterschieden. Das oberirdische Einzugsgebiet wird durch Hügel und Käme begrenzt. Das unterirdische durch geologische Schichten, Klüfte oder unterirdische Höhlen.

3.1.2 Hydrologisches Jahr

Eine weitere Grösse, die für die Hydrologie entwickelt wurde, ist das hydrologische Jahr (Siehe Abbildung 3). Das hydrologische Jahr unterscheidet sich vom gewöhnlichen Kalenderjahr. Diese Definition wird gewählt, um in der Jahresbilanz den Niederschlag zu erfassen, der bereits im vorangehenden Kalenderjahr im Spätherbst und Winter gefallen ist und in den Wintermonaten als Schnee und Eis gespeichert wurde. Diese Niederschläge werden erst im neuen Kalenderjahr als Schmelzwasser abflusswirksam. Für die Schweiz beginnt das hydrologische Jahr aus diesem Grund am 1. Oktober und endet am 30. September. Das hydrologische Jahr beginnt je nach geografischen und klimatologischen Eigenschaften zu einem anderen Zeitpunkt.

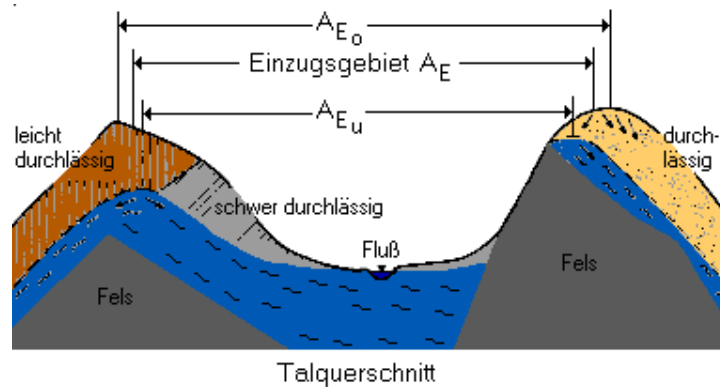


Abbildung 2: Einzugsgebiet (unterteilt in oberirdisches und unterirdisches)

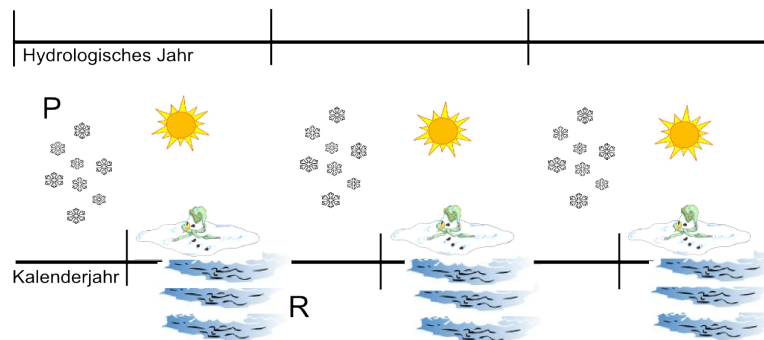


Abbildung 3: Hydrologisches Jahr im Vergleich zu einem Kalenderjahr

3.2 Niederschlag (P, „Precipitation“)

Die Niederschläge lassen sich einteilen in flüssige (Nieselregen, Regen) und feste Niederschläge (einzelne Eiskristalle, Schnee, Graupel, Hagel, Einkörner). Für die Schweiz gilt in der Regel, dass die Jahressumme des Niederschlags mit der Stationshöhe zunimmt.

3.2.1 Messung des Niederschlags

In den schweizerischen Messnetzen werden zur Erfassung des Niederschlags sogenannte Pluviometer verwendet. Diese sammeln Wasser und ermitteln die Menge (durch Volumenmessung oder Wägen). Im Falle von Schneefall muss entweder gewogen werden, oder der Schnee vor der Volumenmessung geschmolzen werden. Das schweizerische Messnetz besitzt zu diesem Zweck beheizte Pluviometer.

Systematischer Niederschlagsmessfehler

Im Messnetz der automatischen Bodenstationen der MeteoSchweiz (SwissMetNet) werden Messgeräte der Typen Pluvio² (mit Wägeprinzip) und Joss-Tognini (mit Kippvorrichtung) verwendet.

Die Art der Konstruktion und die Aufstellungshöhe dieser Pluviometer bedingen einen systematischen Niederschlagsmessfehler: Der Messwert ist geringer als die tatsächliche,

auf die Bodenoberfläche gefallene Niederschlagsmenge. Der Messfehler hat mehrere Ursachen: Deformation des Windfeldes durch das Gerät und dadurch Ablenkung von Niederschlagsteilchen (insbesondere von Schnee), Haftwasser an der Innenwand des Auffanggefäßes, Verdunstung von aufgefangenem Niederschlagswasser, Rückprall von Wassertropfen, Störungen durch Schneetreiben. Hiervon ist die windbedingte Störung die bedeutendste Fehlerursache.

3.2.2 Ermittlung des Gebietsniederschlags

Der Gebietsniederschlag ist der mittlere Niederschlag in einem Gebiet. Dieser muss aus Pluviometer-Messungen von mehreren Stationen des Gebiets bestimmt werden. Da es sich bei diesen Berechnungen um Interpolationen handelt, sind diese Werte mit Unsicherheiten behaftet. Es gibt verschiedene Formen von Interpolationen, die zu diesem Zweck angewendet werden können. Die vier häufigsten Methoden zur Bestimmung des Gebietsniederschlags sind die folgenden:

- Arithmetische Mittelung der Niederschlagsmengen
- Thiessen-Methode (=Polygon-, Mittelsenkrechten-Methode)
- Hypsometrische Methode
- Distanzgewichtete Interpolation Im Zusatzskript findet ihr weitere Informationen zu diesen Methoden.

3.3 Abfluss (R, „Runoff“)

Unter dem Abfluss R versteht man das Wasservolumen, das pro Zeiteinheit einen definierten Fliessquerschnitt (oberirdisch und unterirdisch) durchfließt. Abfluss ist das Ergebnis des Durchganges des Niederschlagswassers durch das Einzugsgebiet, wobei allerdings erhebliche Wasseranteile an Pflanzenoberflächen, an der Bodenoberfläche (Muldenrückhalt), in Schnee, Eis und Gletschern, in stehenden Gewässern, im Boden (Bodenfeuchte) sowie im Grundwasser gespeichert und teilweise durch den Verdunstungsprozess in die Atmosphäre zurückgeführt werden.

Der Abfluss lässt sich in drei Komponenten aufteilen, welche die Oberflächengewässer mit unterschiedlicher Zeitverzögerung erreichen: Oberflächenabfluss, Zwischenabfluss und Grundwasserabfluss. Die ersten beiden sind schneller und werden als Direktabfluss bezeichnet, während der Grundwasserabfluss als langsamer Basisabfluss charakterisiert wird.

3.3.1 Messung des Abflusses

Zur Berechnung des Abflussvolumens wird die Wassermenge sowie die Fließgeschwindigkeit des Gewässers benötigt. Um eine solche Messung durchzuführen, müssen Informationen zum Profil des Fließgewässers bereitstehen. Anschliessend werden die Fließgeschwindigkeit und die Wasserhöhe ermittelt. Dies geschieht gewöhnlicherweise mit-

tels eines hydrometrischen Flügels (Fließgeschwindigkeit) und einer Pegelstandmessung (Wasserhöhe). Die Wassermenge kann dann mithilfe der Angaben zum Profil und zur Wasserhöhe berechnet werden.

3.4 Evapotranspiration (ET, „Evapotranspiration“)

Evapotranspiration ist die Summe aus Wasserabgabe (Transpiration) der Pflanzen und Verdunstung (Evaporation) von der Bodenoberfläche bzw. freien Wasseroberflächen. Es ist wichtig, den Unterschied zwischen aktueller und potentieller Evapotranspiration zu verstehen:

- **Potentielle ET:** maximal mögliche Verdunstung unter den gegebenen klimatischen Bedingungen. Sie wird real nur erreicht, wenn der Boden ständig ausreichend Wasser nachliefern kann. Bestimmt wird sie durch klimatologische Methoden.
- **Aktuelle ET:** reale Verdunstung unter klimatischen Bedingungen. Diese wird mittels einem Lysimeter gemessen und mittels der hydrologischen Methoden berechnet.

Die Evapotranspiration nimmt eine wichtige Rolle im globalen und regionalen Wasserhaushalt ein: Sie bildet den Massentransport von Wasserdampf von der Erdoberfläche in die Atmosphäre. Mit diesem Massentransport fließt Energie in Form von latenter Wärme in die Atmosphäre, welche bei der Kondensation (Wolkenbildung) dann freigesetzt wird. Ausserdem ist der Wasserdampf wichtig für die Absorption und Emission von Strahlung in der Atmosphäre.

Einflussfaktoren der Evapotranspiration sind unter anderem: Strahlung, Lufttemperatur, Wind, relative Luftfeuchtigkeit, Pflanzenart und die Menge des verfügbaren Bodenwassers. Die Verdunstungsrate ist umso grösser, je mehr Wasser, je mehr Energie vorhanden sind, je grösser das Sättigungsdefizit der Luft und je höher die Windgeschwindigkeit ist.

3.4.1 Ermittlung der Evapotranspiration

Weil die Evaporation von so vielen Faktoren abhängig ist, stösst bereits ihre lokale Messung (mittels Lysimeter) im Vergleich zu anderen Wasserhaushaltsgrössen (wie Abfluss und Niederschlag) auf Schwierigkeiten. Eine direkte messtechnische Ermittlung der Evapotranspiration ganzer Einzugsgebiete (Gebietsverdunstung) ist praktisch nicht realisierbar.

Zur Bestimmung der Evapotranspiration existieren allerdings verschiedene Methoden (hydrologische und klimatologische), welche in den nächsten Kapitel erläutert werden.

3.4.2 Hydrologische Methode zur Bestimmung der Evapotranspiration

Unter dem Wasserhaushalt versteht man das Zusammenwirken von Niederschlag, Verdunstung, Abfluss und Änderung des Wasserspeichers in einem Gebiet. Er wird quantitativ beschrieben durch die Wasserhaushaltsgleichung (= Wasserbilanz), die sich stets

auf ein bestimmtes Gebiet und eine bestimmte Zeitspanne bezieht:

$$P = ET + R + \Delta S$$

P = Niederschlag („precipitation“)

ET = Verdunstung („evapotranspiration“)

R = Abfluss („runoff“)

ΔS = Änderung des Wasserspeichers („storage change“)

Im Unterschied zum Niederschlag, dem Abfluss sowie der Speicheränderung lässt sich die Verdunstung nur unmittelbar mittels Lysimeter berechnen. Je länger die untersuchte Zeitspanne dauert und je geringer die Vergletscherung im untersuchten Gebiet ist, desto geringer ist die Speicheränderung. Für eine Zeitspanne über mehrere Jahre kann somit die Speicheränderung vernachlässigt werden und es gilt:

$$P = ET + R$$

Mit dieser vereinfachten Wasserhaushaltsgleichung lässt sich die aktuelle Evapotranspiration eines Einzugsgebietes während eines Jahres bestimmen, sofern Daten über den Niederschlag und den Abfluss verfügbar sind. Diese Methode ist umso zuverlässiger, je besser die Vernachlässigung der Speicheränderung gerechtfertigt ist.

3.4.3 Klimatologische Methode zur Bestimmung der Evapotranspiration

Klimatologische Methoden zur quantitativen Bestimmung der Evapotranspiration lassen sich einteilen in physikalisch begründete und (semi-)empirische Verfahren.

Physikalische Verfahren: Sie sind physikalisch fundiert, das heißt sie basieren auf physikalischen Zusammenhängen zwischen Parametern. Sie liefern relativ genaue Werte und ermöglichen eine hohe zeitliche Auflösung. Ihr Nachteil ist jedoch der grosse messtechnische Aufwand.

(Semi-)empirische Verfahren: Sind auf experimentellen Daten basierende Näherungsformeln, das heißt die Formeln wurden anhand von Erfahrungswerten entwickelt. Diese Methoden sind zwar einfach zu handhaben, eignen sich allerdings nur für grobe Abschätzungen und für geringe zeitliche Auflösungen. Drei einfach anzuwendende empirische Formeln aus der grossen Auswahl sind diejenigen von Haude (1955), Blaney & Criddle (1950, 1962) und Turc (1961).

3.5 Tipps zu den Aufgaben

3.5.1 Aufgabe 1

- Die klimatologischen Methoden (BC und Turc) liefern die potentielle ET, die hydrologischen Methoden die aktuelle ET (siehe Kapitel 3.4).
- Die hydrologische Methode hängt von meteorologischen Bedingungen ab.
- Die klimatologische Methode hängt von klimatischen Bedingungen ab.
- Klimatische Bedingungen in einem Gebiet verändern sich über die Jahre nicht stark.

- Der Sommer 2003 war sehr heiss.
- Die verwendeten klimatologischen Methoden sind empirisch und wurden für Nordafrika, Frankreich und den Westen der USA entwickelt. Die Anpassungen für die Schweiz sind zum Teil ungenügend.

3.5.2 Aufgabe 2

- Die Evapotranspiration hängt von der Temperatur ab.

3.5.3 Aufgabe 3

- Niederschlag führt zu Evapotranspiration und Abfluss.
- Je höher ein Gebiet liegt, desto wichtiger ist die Abflusskomponente, da das Wasser besser abfliessen kann.

4 Aufgaben

In diesem Versuch werden wir uns morgens mit der Analyse von hydrologischen Daten und der Bestimmung der Evapotranspiration beschäftigen und nachmittags selber an der NEUER FLUSS EINFUEGEN eine hydrologische Abflussmessung durchführen. Aufgaben 1 bis 3 sollen euch einen Einblick in die Datenanalyse und die verschiedenen Methoden zur Bestimmung der Evapotranspiration verschaffen.

Ihr bildet 3 Gruppen. Alle Aufgaben werden von Allen gelöst. Anschliessend wird sich jede der Gruppen mit jeweils einer Aufgabe intensiver auseinandersetzen und zum Schluss die Resultate in einer kurzen Präsentation den Anderen vorstellen.

In der Theorie findet ihr nützliche Informationen für die Präsentationen und im Anhang habt ihr einige Infos zum Standort und der Höhe der Stationen, die in den Aufgaben betrachtet werden.

4.1 Aufgabe 1: Klimatologische vs. hydrologische Methode zur Bestimmung der Evapotranspiration

Hier werden wir die Evapotranspiration an sich genauer betrachten (siehe Abb. 4). Unterschiedliche Methoden zur empirischen (auf Erfahrung beruhenden) Ermittlung der Evapotranspiration werden verglichen.

Plottet die Evapotranspiration mittels zwei hydrologischer Methoden eurer Wahl und

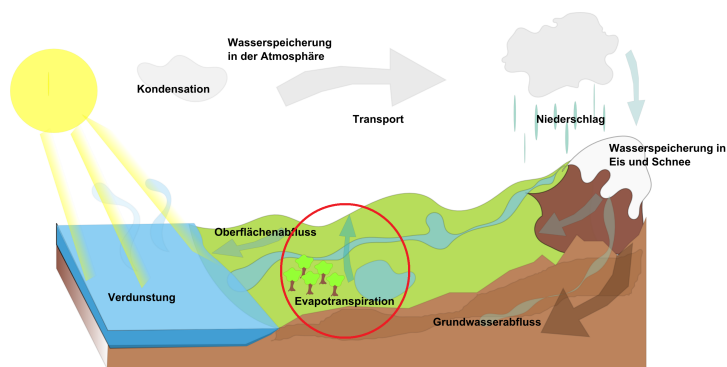


Abbildung 4: Die Evapotranspiration ist ein Teil des Wasserkreislaufes.

der zwei klimatologischen Methoden (BC und Turc). Vergleicht anschliessend anhand eurer Plots die Methoden miteinander. Benutzt dazu den Matlab-Code **Aufgabe_1**. Erläuterungen dazu findet ihr im zusätzlich ausgeteilten Skript.

a.)

Seht euch den Matlab-Code an und versucht ihn zu verstehen. Wendet euch bei Fragen an die Versuchsassistenten.

b.)

In diesem Code wird die Evapotranspiration auf 4 verschiedene Arten berechnet. Welche Arten sind das und wo im Code passiert das?

c.)

Schaut Euch die Formeln aller Methoden aus dem Code an und erklärt die Terme und Variablen. Wie werden die einzelnen Parameter gemessen oder bestimmt und wo liegen die Schwierigkeiten dabei? Was ist der Hauptunterschied zwischen der klimatologischen und der hydrologischen Methode?

Die Formelsammlung im Anhang und die Theorie helfen Euch dabei.

d.)

Findet ihr Unterschiede je nach Methode und Jahr?

e.)

Versucht diese Unterschiede zu begründen.

In der Theorie findet ihr Tipps dazu.

4.2 Aufgabe 2: Höhenabhängigkeit der Evapotranspiration

In dieser Aufgabe werden wir die Evapotranspiration in Abhängigkeit von der Höhe betrachten (siehe Abb. 5).

Plottet mithilfe des Matlab-Codes **Aufgabe_2** die Evapotranspiration nach klimato-

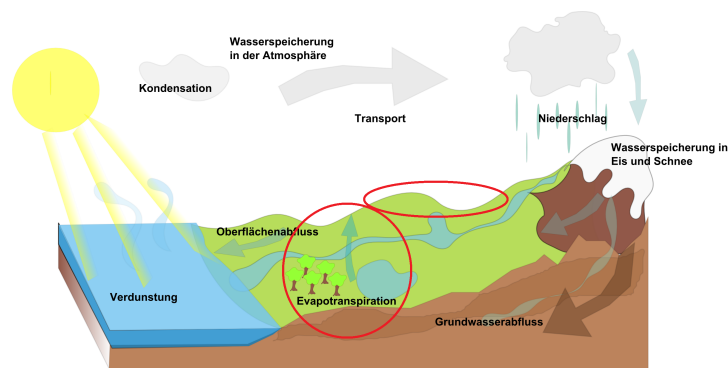


Abbildung 5: Die Evapotranspiration findet in den unterschiedlichsten Höhen statt.

logischer Methode über die Höhe.

a.)

Seht euch den Matlab-Code an und versucht ihn zu verstehen. Wendet euch bei Fragen an die Versuchsassistenten.

b.)

Erläutert an Hand der klimatologischen Formel im Code, welche Parameter wie gemessen oder bestimmt werden.

Die Formelsammlung im Anhang und die Theorie helfen Euch dabei.

c.)

Wo wird in diesem Code bestimmt, was geplottet wird?

d.)

Gibt es einen Zusammenhang zwischen Höhe und Evapotranspiration?

e.)

Wodurch wird der beobachtete Zusammenhang verursacht und welche Folgen hat dieser Zusammenhang?

4.3 Aufgabe 3: Beziehung zwischen Evapotranspiration und Gebietsniederschlag

Nun soll anhand der hydrologischen Methode untersucht werden, inwiefern Evapotranspiration und Niederschlag in Verbindung miteinander stehen (siehe Abb. 6). Die Bestimmung des Gebietsniederschlags geschieht anhand vier verschiedener Methoden: arithmetische, hypsometrische, distanzgewichtete und jene nach Thiessen.

Fertigt dazu Plots der drei unterschiedlichen Gebiete mithilfe des Matlab-Codes **Auf-**

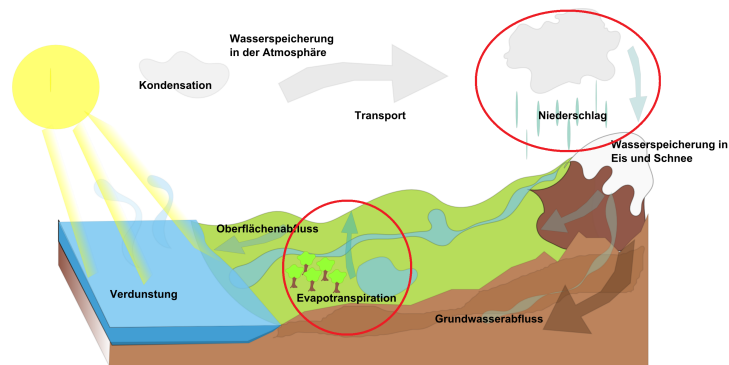


Abbildung 6: Evaporation führt gemeinsam mit Verdunstung zu Niederschlag.

gabe_3 an.

a.)

Seht euch den Matlab-Code an und versucht ihn zu verstehen. Wendet euch bei Fragen an die Versuchsassistenten.

b.)

Wie kann in diesem Code das Gebiet gewechselt werden, dass geplottet werden soll? Wie passt ihr die Überschrift des Plots entsprechend an?

c.)

Erklärt den Zusammenhang zwischen Evapotranspiration und Gebietsniederschlag. Versucht diesen zu begründen.

d.)

Welche Unterschiede stellt ihr zwischen den Gebieten fest?

e.)

Wie erklärt ihr euch diese Unterschiede?

f.)

Erklärt die hydrologische Methode der Bestimmung der Evapotranspiration. Was bedeuten die Parameter und wie werden sie bestimmt? Wieso ist die klimatologische Methode ungeeignet zur Beschreibung der Beziehung zwischen Evapotranspiration und Niederschlag?

Die Formelsammlung im Anhang und die Theorie helfen Euch dabei.

5 Anhang

5.1 Informationen zu den Einzugsgebieten und deren Stationen

Tabelle 1: Einzugsgebiete und deren Stationen

Einzugsgebiet Grösse	Station	Höhe
Sitter 74 km ²	Saentis	2502
	St. Gallen	779
Murg 207 km ²	Napf	1406
	Wynau	422
Ergolz 261 km ²	Basel-Binningen	316
	Wynau	422



Abbildung 7: Standort der Stationen

5.2 Formelsammlung

Hydrologische Methode

Es wird die aktuelle Evapotranspiration berechnet.

$$P = ET + R + \Delta S \quad (1)$$

mit

P = Niederschlag

ET = Verdunstung

R = Abfluss

ΔS = Änderung der Speicherung Mittels Lysimeter lässt sich P, R und ΔS messen und daraus kann die ET ermittelt werden.

Klimatologische Methoden

Es wird die potentielle Evapotranspiration berechnet.

Formel nach Haude

$$ETP = f * (e_s(T) - e)_{14} \leq 7 \quad (2)$$

mit

ETP: mittlere potentielle Evapotranspiration [mm/hPa] f: Haude Faktor für einzelne Monate [mm/hPa], wird tabellarisch für jeden Monat aufgelistet

$(e_s - e)_{14}$: Sättigungsdefizit der Luft mit Wasserdampf in hPa zum Mittagstermin (14:30 MEZ)

$$(e_s - e) = e_s(T) * \left(1 - \frac{RH}{100}\right) \quad (3)$$

mit

T: aktuelle Temperatur

$e_s(T)$: Sättigungsdampfdruck bei Temperatur T

RH: relative Luftfeuchte

Formel nach Blaney & Criddle

$$ETP = p * (0.457 * T_m + 8,128)[mm/d] \quad (4)$$

mit

ETP: mittlere potentielle Evapotranspiration pro Tag

T_m : mittlere monatliche Lufttemperatur [Grad C]

p: mittlere astronomisch mögliche Sonnenscheindauer pro Tag in Prozent der Jahressumme der astronomisch möglichen Sonnenscheindauer. Diese Werte werden tabellarisch für jeden Monat und bei einem festgelegten Breitengrad aufgelistet.

Formel nach Turc

$$ETP = 0.0133 * \frac{T_m}{T_m + 15} * (R_s + 50) * C [mm/d] \quad (5)$$

mit

C bei $RH < 50\%$: $C = 1 + \left(\frac{50-RH}{70}\right)$

C bei $RH > 50\%$: $C = 1$

ETP: mittlere potentielle Evapotranspiration pro Tag

T_m : mittlere monatliche Lufttemperatur

R_s : mittlere Globalstrahlung pro Tag

RH: mittlere monatliche relative Luftfeuchtigkeit